

基于氢燃料的 SOFC-“GT+ST”系统方案与性能研究

程云端^{1,✉}, 郑莆燕², 杨海森¹, 成霞¹, 宋佳刚¹, 李华建¹

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;
2. 上海电力大学能源与动力机械工程学院, 上海 200000)

摘要: [目的] 针对以氢为燃料的固体燃料电池, 提出了燃料电池阴阳两极分别进入燃气透平和蒸汽透平做功的 SOFC-“GT+ST”系统, 分析不同参数对系统效率的影响, 为氢燃料电池与透平耦合系统提供参考意见。[方法] 基于 Epsilon 软件建立系统模型, 在给定参数下和 SOFC-GT 系统比较, 并研究了燃料利用率、压缩机压比、空气流量、SOFC 入口工质温度对 SOFC-“GT+ST”系统总发电效率的影响。[结果] 结果表明与 SOFC-GT 系统相比, SOFC-“GT+ST”系统的总发电功率增加至 73.3 MW, 较原系统提升 5.74%, 发电效率达到 60.13%; 燃料电池的燃料利用率、压缩机压比、电池入口温度及空气流量都会对系统的总发电效率产生影响, 其中燃料利用率存在最佳值, 空气流量有一个合理的取值范围, 而电池入口温度和压缩机压比越高系统发电效率越高。[结论] 在该文设定的结构和参数下, 燃料电池的燃料利用率最佳值为 0.85, 空气流量取值应在 35~39 kg/s 之间。该改进系统可有效提高 SOFC 与透平联合发电系统的总发电效率, 该文的研究结果为系统参数的选择提供了参考。

关键词: 氢燃料电池; SOFC-“GT+ST”; SOFC-GT; 系统建模; 总发电效率; 系统参数

中图分类号: TK01; TK91

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)

OA: <https://www.energychina.press/>

Design and Performance Study of SOFC-“GT+ST” System Based on Hydrogen Fuel

CHENG Yunrui^{1,✉}, ZHENG Puyan², YANG Haisen¹, CHENG Xia¹, SONG Jiagang¹, LI Huajian¹

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;
2. College of Energy and Power Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200000, China)

Abstract: [Introduction] For the oxygen ion conductive solid fuel cell fueled by hydrogen, the paper proposed a SOFC-“GT+ST” system with the cathode and anode of the fuel cell entering the gas turbine and steam turbine respectively, and analyzed the impact of different parameters on system efficiency, providing reference opinions for hydrogen fuel cell and turbine coupling systems. [Method] A system model was established using the software Epsilon. The model was compared with the SOFC-GT system under the given parameters. Additionally, the study investigated the effects of fuel utilization, compressor pressure ratio, air flow and SOFC inlet working fluid temperature on the total power generation efficiency of SOFC-“GT+ST” system. [Result] The results show that compared with the SOFC-GT system, the total power generation of the SOFC-“GT+ST” system increases to 73.3 MW, representing a 5.74% improvement over the original system, with a power generation efficiency of 60.13%. The fuel utilization of the fuel cell, the compressor pressure ratio, the cell inlet temperature and the air flow rate all affect the system’s total power generation efficiency. Among these factors, there is an optimal value for fuel utilization and a reasonable range for the air flow rate. Additionally, higher cell inlet temperature and compressor pressure ratio lead to higher power generation efficiency of the system. [Conclusion] Under the structure and parameters defined in this study, the optimal value of fuel utilization of fuel cell is 0.85, and the air flow value should be between 35 and 39 kg/s. The improved system can effectively enhance the total power generation efficiency of SOFC and turbine combined power generation system. The

收稿日期: 2024-02-21 修回日期: 2024-03-29

基金项目: 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司科技项目“源网荷储一体化柔性调控数字基座”(ER11221W)

results of this study provide a reference for the selection of system parameters.

Key words: hydrogen fuel cells; SOFC-"GT+ST"; SOFC-GT; system modeling; total power generation efficiency; system parameters

0 引言

在“碳中和”的愿景下太阳能发电和风力发电得以大规模发展同时也带来了弃光弃风难以利用的问题^[1-3]。利用不稳定的可再生能源制氢是减小弃光弃风的有效方法之一。随着可再生能源制氢产业的快速发展,氢能的利用已成为当下热点。氢气在源网荷储侧可灵活调节,源侧实时消纳“弃电”,网侧调峰,荷侧削峰填谷^[4-7]。目前荷侧氢气作为燃料直接参与发电,在氢能发电方面,氢燃料电池因直接将氢能中的化学能转换为电能和热能,发电效率高且副产物中只有水等特点为氢能利用的重要方式^[8-11]。

燃料电池中固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)实际工作温度由于工程实际中材料因素,电池通常在 850 ℃,但理论上电池工作温度可达 1 000 ℃^[12-13],乏气温度较高,故为利用高温乏气,燃料电池通常下接燃气轮机组成 SOFC-GT(Gas Turbine, 燃气轮机, 本文简称为 GT)联合循环系统以实现能量的高效利用^[14]。卢立宁等人^[15]对 SOFC-GT 系统进行热力分析,建立系统的计算模型,分析出重要运行参数对系统性能影响。段立强等人^[16]对燃料电池与燃气轮机的系统结构进行改进,设立两级 SOFC 串联,建立了新的燃料电池与燃气轮机联合的系统结构。结果证明能有效提高燃料电池与燃气轮机联合循环系统的发电效率。陈启梅等人^[17]对燃料电池-燃气轮机混合发电系统的设计点和非设计点性能进行了计算分析。因燃料电池下接燃气轮机系统中乏气余热较多有重要的回收利用价值,是当前研究氢燃料电池的重要方向,岳秀艳等人^[18]提出了一种由 SOFC/GT 和具有富氨蒸气回热器的 Kalina 循环组成的 SOFC/GT/KCS 联合循环系统,对该系统的热力学性能进行了研究。蒙青山等人^[19]研究了 SOFC-GT-TRCC(跨临界二氧化碳)联合系统,研究表明该系统是 SOFC-GT 乏气利用的有效方法。Wang 等人^[20]研究 SOFC-GT 下接 Kalina 联合循环系统,对该系统进行关键性热力学参数分析。Gandiglio^[21]等人对 SOFC-GT 下接 HRSC(热回收蒸气循环)系统进行热力学和经济性分析。目前许多

学者也有对 SOFC 本身的研究。杨智敏等人^[22]基于应用电化学和热力学理论对燃料电池建模并进行理论分析。梁前超等人^[23]通过 simulink 软件建立 SOFC 模型。魏炜等人^[24]研究 SOFC 入口燃料组分不同对电池性能影响得出 H₂ 占比越高则性能越好。

当氢气作为燃料,燃料电池阳极乏气的成分主要是水蒸汽和少量的残余氢气,阴极乏气成分主要是剩余空气^[25]。而常规 SOFC-GT 系统大多是将燃料电池阳极乏气与阴极乏气混合,并对残余燃气补燃后,送入燃气透平膨胀做功,并不能充分利用阳极乏气中的水蒸汽做功能力。

针对以氢为燃料的固体燃料电池,为充分利用阳极乏气中的水蒸汽做功能力,本文提出阴阳两级乏气分开进入不同透平做功的 SOFC-"GT+ST"(Steam Turbine, 蒸汽轮机, 本文简称为 ST)系统方案,充分利用燃料电池中阳极高浓度水蒸气热能,并对该系统进行关键参数分析。

1 系统方案描述

1.1 常规 SOFC-GT 系统

如图 1 所示,常规的 SOFC-GT 系统由空气压缩机,燃料压缩机,SOFC,燃气轮机和换热器组成。该系统的工艺流程为:燃料进入燃料压缩机进行压缩,压缩后的燃料进入燃料回热加热器吸收燃气透平乏气热量,加热后的燃料进入 SOFC 的阳极,经 SOFC 反应后的阳极乏气送入补燃室与 SOFC 的阴极的乏气进行补燃,补燃室的乏气进入燃气透平进行膨胀做功,燃气透平的高温乏气进入空气回热加热器将热量传递给空气,而后进入下一级燃料回热加热器将热量传递给燃料,最后排出;压缩后的空气吸收空气回热加热器中的乏气余热后,送入 SOFC 的阴极,经过 SOFC 反应后的阴极乏气进入补燃室与 SOFC 阳极的乏气进行混合并燃烧,将 SOFC 剩余的氢气反应完全。

1.2 SOFC-"GT+ST" 系统

为充分利用 SOFC 阳极乏气中水蒸汽的做功能力,对 SOFC-GT 系统进行改进,阴阳两级分开建立如图 2 所示的系统。该系统取消了阴阳极乏气混合

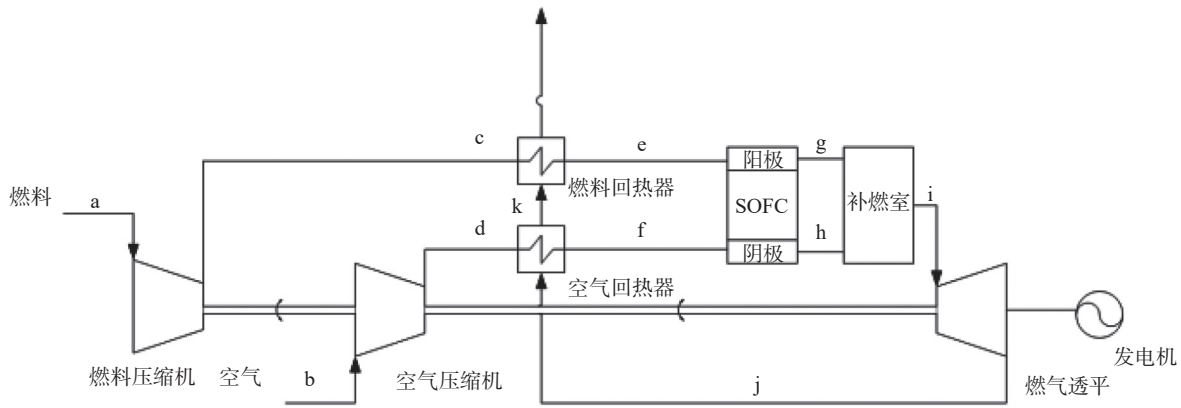


图 1 SOFC-GT 系统
Fig. 1 SOFC-GT system

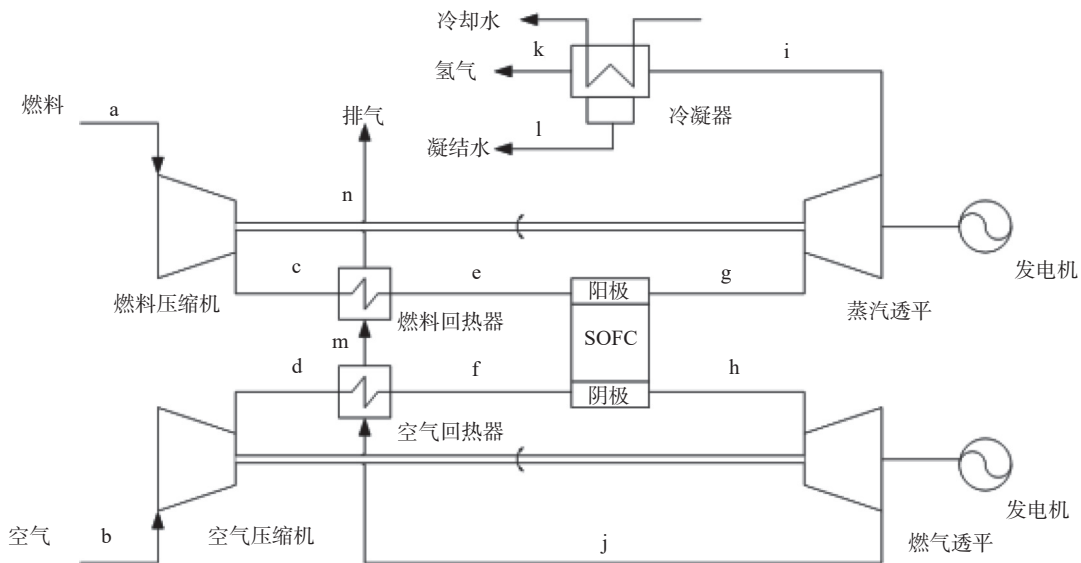


图 2 SOFC-“GT+ST” 系统
Fig. 2 SOFC-“GT+ST” system

燃烧部分, 阴极乏气直接通入燃气透平进行膨胀做功, 而阳极乏气通入蒸汽透平膨胀做功。因为阳极乏气中水蒸汽浓度较高, 蒸汽透平乏气采用冷凝器冷却, 背压可以低于大气压。理想条件下 SOFC 充分利用氢燃料使阳极乏气全为水蒸气时, 蒸汽透平背压可低至 5 kPa^[26]。但因现有技术原因, 不能将氢气完全反应, 故阳极乏气中含有少量氢, 所以蒸汽透平背压会按照水蒸气和氢气占比选取而高于 5 kPa, 但仍低于大气压。蒸汽透平乏气通过冷凝器, 使得管道中残余氢气分离。

2 系统建模

为方便计算系统各个节点参数和分析系统热力

性能, 做出以下假设^[27]:

- 1) 忽略装置和管道的压损和热损失。
- 2) 系统的各个节点已处于稳态。
- 3) 环境温度为 20 °C, 0.1 MPa。
- 4) 补燃室内为充分燃烧, 燃烧效率 100%。

2.1 SOFC 模型

SOFC 基本工作原理如图 3 所示: 空气与燃料压缩加热后送分别送入电池阴极和阳极, 空气在阴极中得到电子生成 O²⁻并通过电解质送入阳极与燃料反应^[28]。

氧气在阳极中反应, 反应式为:



氢气在阴极中与阳极通过电解质传送过来的氧



图3 SOFC工作原理

Fig. 3 Working principle of SOFC

离子进行反应, 反应式为:



SOFC 实际输出电压为理想可逆电压减去电池在运行时各个部分的损失, 公式如下:

$$U = E - U_{\text{act}} - U_{\text{conc}} - U_{\text{ohm}} \quad (3)$$

式中:

U ——实际输出电压(V);

E ——理想可逆电压(V);

U_{act} ——活化极化损失(V);

U_{conc} ——浓差极化损失(V);

U_{ohm} ——欧姆极化损失(V)。

SOFC 的输出功率公式如下:

$$P_{\text{SOFC}} = U \cdot I \quad (4)$$

式中:

I ——SOFC 的总电流(A)。

2.2 压缩机模型

压缩机部分耗功计算公式如下:

$$W_{\text{Cs}} = m(h_{1s} - h_0) \quad (5)$$

$$\eta_{\text{Cs}} = \frac{W_{\text{Cs}}}{W_{\text{C}}} \quad (6)$$

式中:

W_{Cs} ——压气机的等熵耗功(kW);

m ——工质的质量流量(kg/s);

h_{1s} ——等熵压缩下压气机出口焓值(kJ/kg);

h_0 ——压缩机进口工质焓值(kJ/kg);

h ——焓值(kJ/kg);

η_{Cs} ——等熵效率, 取值为 0.85;

W_{C} ——实际耗功(kW)。

2.3 补燃室模型

补燃室是将 SOFC 乏气中未反应的氢气通过补燃提高燃气透平人工质的温度, 能量守恒方程为:

$$Q_{\text{H}_2, \text{LHV}} + \sum m_0 h_0 = m_1 h_1 \quad (7)$$

式中:

$Q_{\text{H}_2, \text{LHV}}$ ——燃料的低位发热量(kJ/kg);

$\sum m_0 h_0$ ——补燃室入口工质焓总和(kW);

m_1 ——燃室出口工质流量(kg/s);

h_1 ——补燃室出口工质焓值(kJ/kg)。

2.4 透平模型

透平作为将高压工质进行膨胀做功部件, 可看成压缩过程的逆过程, 用等熵模型建模, 透平做功公式如下:

$$\eta_{\text{Gs}} = \frac{h_0 - h_1}{h_0 - h_{1s}} \quad (8)$$

$$W_{\text{G}} = m(h_1 - h_0) \quad (9)$$

式中:

η_{Gs} ——透平等熵效率, 取值 0.85;

h_1 ——透平出口焓值(kJ/kg);

h_0 ——透平进口工质焓值(kJ/kg);

h_{1s} ——透平等熵做功下透平出口焓值(kJ/kg);

W_{G} ——透平输出功(kW)。

2.5 蒸汽透平背压计算

常规蒸汽循环中, 乏气直接进凝汽器, 采用环境温度的冷却水冷却后, 凝结水温度约为 32 ℃, 乏气压力为凝结水温度下的饱和压力, 可降至大气压以下, 在设计分析中可以取为 5 kPa^[29]。SOFC 阳极乏气引入凝汽器, 采用与其相同的冷却方式, 使其中蒸汽凝结, 则乏气中水蒸气的分压力为凝结水对应的饱和压力, 可达到 5 kPa。

基于道尔顿分压定律可知, 阳极透平乏气的压力应为乏气中水蒸汽分压力和氢分压力之和。

$$\sum P = P_{\text{H}_2\text{O}} + P_{\text{H}_2} \quad (10)$$

式中:

$\sum P$ ——乏气总压(Pa);

$P_{\text{H}_2\text{O}}$ ——水蒸汽分压(Pa);

P_{H_2} ——氢分压(Pa)。

而混合气体中水蒸汽的分压力占比与水蒸汽的摩尔浓度相等。

按照蒸汽透平中水蒸汽与氢气的摩尔占比选取蒸汽透平背压, 背压选取公式如下:

$$\sum P = P_{\text{H}_2} \frac{n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{H}_2}}{n_{\text{H}_2}} \quad (11)$$

式中:

$\sum P$ —— 蒸气透平乏气压力(Pa);
 n_{H_2O} 、 n_{H_2} —— 乏气中水蒸气和氢气物质的摩尔量(mol)。

2.6 系统总发电效率

SOFC-GT 系统的总发电功率为:

$$W_{net} = W_{SOFC} + (W_{GT} - W_{c1} - W_{c2})\eta_m \quad (12)$$

式中:

η_m —— 传动轴效率, 取值为 0.99。

系统的总发电效率为:

$$\eta_{net} = \frac{W_{net}}{Q_{H_2,LHV,in} (m_{H_2,in} - m_{H_2,out})} \quad (13)$$

式中:

m_{H_2} —— 氢气的质量流量(kg/s);

$Q_{H_2,LHV}$ —— 氢气的低位发热量(kJ/kg)。

2.7 模型验证

本文基于 ebsilon 平台对系统进行建模计算。以 SOFC-GT 系统为例, 参照文献 [30]、文献 [31] 分别搭建 SOFC-GT 系统和燃料电池模型, 并将计算数据与文献中给出的数据相对比如表 1 ~ 表 2 所示, 最大误差小于 1%。

表 1 SOFC-GT 计算结果对比

Tab. 1 Comparison of calculation results

参数	文献值 ^[30]	计算值	误差
透平入口工质温度/℃	1 136	1 136.6	0.05%
SOFC功率/kW	359	359.4	0.11%
透平功率/kW	104	104.2	0.19%
总功率/kW	463	463.6	0.13%

表 2 燃料电池计算结果对比

Tab. 2 Comparison of fuel cell calculation results

参数	文献值 ^[31]	计算值	误差
阳极出口氢气占比/%	9.2	9.19	0.1%
阳极出口水蒸气占比/%	90.8	90.81	0.1%
阳极出口温度/℃	910	900.045	1.09%

3 系统比较

表 3 给出了各系统的参数设置, 表 4 给出了系统中的各个部件的参数设定, 其中燃料利用率定义为: 参与反应的燃料量与电池入口燃料量之比。

表 5 为上述条件下各系统模型计算结果。

表 3 循环系统参数

Tab. 3 Recirculation system parameters

参数	数值
环境温度/K	293.15
环境压力/MPa	0.1
空气流量/(kg·s ⁻¹)	40
燃料流量/(kg·s ⁻¹)	1
燃气透平透平出口压力/MPa	0.15
燃料电池入口空气温度/℃	500
燃料电池入口燃料温度/℃	500
燃料中氢气摩尔数占比/%	100

表 4 系统部件参数设置

Tab. 4 System component parameter settings

参数	数值
压缩机压比	10
补燃室燃烧效率/%	100
压缩机等熵效率/%	85
燃料利用率/%	85
SOFC电气效率/%	57
SOFC工作温度/℃	1 000

表 5 各系统做功结果比较

Tab. 5 Comparison of work results of different system

参数	SOFC-GT	SOFC-“GT+ST”
燃料电池发电功率/MW	58.793	58.793
透平做功/MW	28.141	30.937
压缩机耗功/MW	17.674	17.674
系统总发电功率/MW	69.32	73.30
系统发电效率/%	57.59	60.13

由表 5 可看出, 相对 SOFC-GT 系统, SOFC-“GT+ST” 系统的发电功率增加至 73.3 MW, 总发电效率提高至 60.13%。SOFC-“GT+ST” 系统, 在燃料电池阴阳两级乏气分别进入透平做功的情况下, 燃料电池做功量不变, 但由于蒸汽透平背压低做功量提高, 透平的净输出功率增加, 而且回收了乏气中的氢气, 因此系统的发电效率有较大提高。

4 SOFC-“GT+ST” 系统参数影响分析

在 SOFC-“GT+ST” 系统中, 关键参数的选取会对系统效率产生很大影响。下面分别对该系统进行关键参数在合理范围下变化对总发电效率能影响分

析,为优化系统性能和对系统初参数的选择提供依据。

4.1 燃料利用率的影响

图 4 给出了系统发电效率随燃料利用率的变化。可得:随燃料利用率的增大,双 SOFC-“GT+ST”系统的发电效率先增加后下降,在燃料利用率为 0.85 时达到最大。

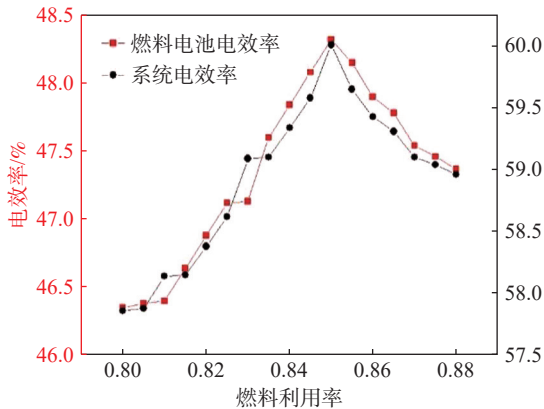


图 4 燃料利用率对系统发电效率的影响
Fig. 4 Effect of fuel utilization on system power generation efficiency

图 5 给出了系统中发电功率随燃料利用率的变化。由图 5 可知 SOFC 发电功率随着燃料利用率的增加先增后降。原因在于 SOFC 的参与反应的 H_2 量增加,SOFC 的电流增大,但出口 H_2O 分压增大,工作电压降低,故燃料利用率对 SOFC 的影响取决于电流增加量与电压减少量之比。透平发电功率随着燃料利用率的增加先减后增原因在于参与电池反应的 H_2 量增加,为降低电池出口乏气温度,等比例增加电池冷却水流量进一步导致电池工质出口温度降低,最终透平工质入口温度降低,透平发电功率减小。

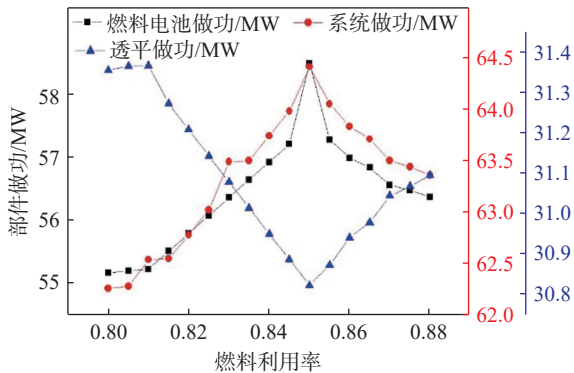


图 5 燃料利用率对系统部件输出功的影响
Fig. 5 Effect of fuel utilization on output work of system components

当 SOFC 发电量减少时,透平输出功增加,SOFC 发电量增加时,透平输出功减少。SOFC 发电量变化的幅度大于透平输出功变化的幅度,故系统的发电效率主要由 SOFC 的发电效率影响。

4.2 压缩机压比的影响

图 6 给出了压缩机压比对系统部件输出功率的影响。由图 6 可得 SOFC 发电功率随压比的增大而增加但增幅持续减小,透平输出功呈线性增加。原因在于:SOFC 入口工质压力增大,工作压力增大使工作电压增大导致 SOFC 发电效率增加;透平入口处的压力增加使得透平的输出功增加。

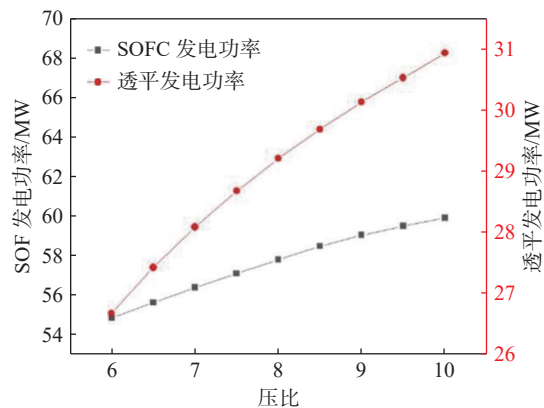


图 6 压缩机压比对输出功的影响
Fig. 6 The effect of compressor pressure ratio on output work

图 7 给出了压缩机压比对系统发电效率的影响。由图 7 可得系统发电效率随着压比增大而增加,当压比接近 10 时,增幅减缓。原因在于:透平入口处压力增加,透平输出功随之增加,压比增大则压缩机耗功增加,但压缩机耗功的增加小于透平和 SOFC 发电量的增加。但 SOFC 发电量随压力增大而增幅减小,故系统发电效率增幅减缓,由于压缩机性能,压比不能一直增加,所以要选取合适的压比来提高系统的性能。

4.3 电池入口温度和空气流量的影响

图 8 给出了空气流量和 SOFC 入口工质温度对部件功率的影响。由图 9 可得:SOFC 的发电量随空气流量的增加先增后减,透平做功量增加,且都随 SOFC 入口工质温度的增加功率都增大,原因在于:当空气流量低时,空气量不够与 H_2 在 SOFC 内反应,所以空气流量增大,参与反应的 H_2 量增多,SOFC 发电效率增加,当空气流量满足 H_2 反应时,空气流量

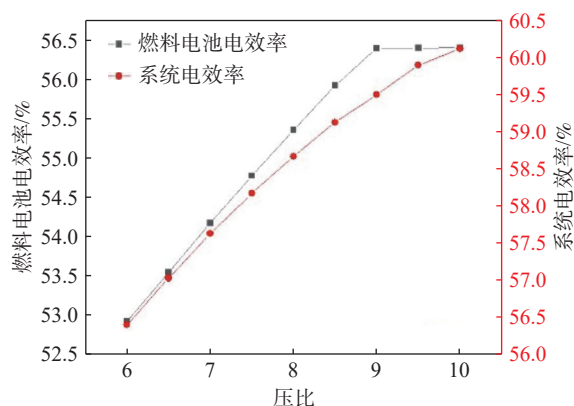


图 7 压缩机压比对效率的影响

Fig. 7 Effect of compressor pressure ratio on efficiency

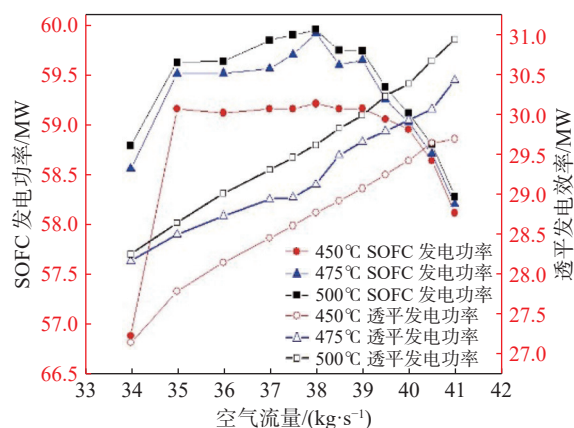


图 8 不同电池入口温度下空气流量对输出功的影响

Fig. 8 Effect of air flow on output work at different cell inlet temperatures

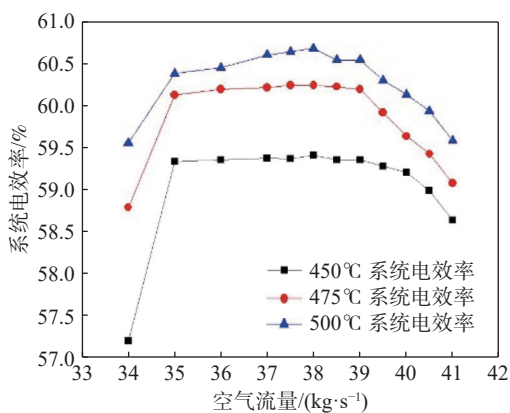


图 9 不同电池入口温度下空气流量对效率的影响

Fig. 9 Effect of air flow on efficiency at different cell inlet temperatures

增加, SOFC 工质出口温度降低, SOFC 的工作电压减小, 导致 SOFC 的发电效率降低, 空气流量增大, 使进入透平做功的工质的量增加, 透平工质入口温

度降低的幅度小于进入透平做功的工质量的增加幅度, 所以透平的做功量增加。当 SOFC 入口工质温度越高, 输出电压随工质温度增加而增加, 且透平入口温度增加, 故透平做功增加。

图 9 给出了空气流量和 SOFC 入口工质温度对系统发电效率的影响。由图 9 得: 系统发电效率随空气流量先增大, 后增幅减缓趋近平稳, 空气流量接近 39 kg/s 时, 开始下降, 原因在于: SOFC 发电量在空气流量在 35 kg/s 前与其成正比相关, 在 35~39 kg/s 时趋于稳定, 透平发电量持续增加, 但增加量小于 SOFC 发电量的减少。

5 结论

1) 与常规 SOFC-GT 系统相比, SOFC-“GT+ST”系统因为充分利用了燃料电池阳极乏气中水蒸汽的做功能力, 提高了系统的发电效率在给定条件下达到 60.13%, 相比常规 SOFC-GT 系统提高了 2 个百分点以上。

2) 在 SOFC-“GT+ST”系统中, 燃料电池的燃料利用率、压缩机压比、电池入口温度及空气流量都会对系统的发电效率产生影响。电池入口温度越高系统效率越高, 压缩机压比越高系统效率越高, 但提高幅度越来越小, 比空气流量应在 35~38 kg/s 的范围内选取系统发电效率较高。

3) 在 SOFC-“GT+ST”系统中, 燃料电池的燃料利用率并不是越大越好, 存在最佳值, 在本文设定的结构和参数下, 燃料电池的燃料利用率最佳值为 0.85。

参考文献:

- [1] 江华. 未来光伏发电技术的发展趋势预测 [J]. 太阳能, 2022(1): 5-13. DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20210727.a.
JIANG H. Forecast of development trend of PV power generation technologies in the future [J]. *Solar energy*, 2022(1): 5-13. DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20210727.a.
- [2] 徐纪忠, 潘国兵, 陈坚, 等. 海上风电场自耗能现状及海上风电发展趋势分析 [J]. 太阳能, 2022(9): 28-35. DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20210811.01.
XU J Z, PAN G B, CHEN J, et al. Self-energy consumption status of offshore wind farms and development trend analysis of offshore wind power [J]. *Solar energy*, 2022(9): 28-35. DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20210811.01.
- [3] 王青, 江华, 李嘉彤, 等. 中国及全球光伏产业发展形势分析 [J]. 太阳能, 2022(11): 5-10. DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20220829.b.

- WANG Q, JIANG H, LI J T, et al. Analysis on the development situation of China and global PV industry [J]. *Solar energy*, 2022(11): 5-10. DOI: [10.19911/j.1003-0417.tyn20220829.b](https://doi.org/10.19911/j.1003-0417.tyn20220829.b).
- [4] 许传博, 刘建国. 氢储能在我国新型电力系统中的应用价值、挑战及展望 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(3): 89-99. DOI: [10.15302/J-SSCAE-2022.03.010](https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2022.03.010).
- XU C B, LIU J G. Hydrogen energy storage in China's new-type power system: application value, challenges, and prospects [J]. *Strategic study of CAE*, 2022, 24(3): 89-99. DOI: [10.15302/J-SSCAE-2022.03.010](https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2022.03.010).
- [5] 刘畅, 林汉辰, 史陈芳达, 等. 中国氢燃料电池汽车市场发展现状及展望 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(2): 162-171. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.16](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.16).
- LIU C, LIN H C, SHI C F D, et al. Development status and outlook of hydrogen powered fuel cell vehicle market in China [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(2): 162-171. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.16](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.16).
- [6] 钟依庐, 刘为雄, 郑赞, 等. 风火储氢碳多能耦合打捆送出模式研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(4): 122-130. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.012](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.012).
- ZHONG Y L, LIU W X, ZHENG Y, et al. Electricity transmission strategy research based on wind-coal-battery-hydrogen-CCUS multi energy coupling and bundling system [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(4): 122-130. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.012](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.012).
- [7] 张丝钰, 张宁, 卢静, 等. 绿氢示范项目模式分析与发展展望 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(3): 89-96. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.009](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.009).
- ZHANG S Y, ZHANG N, LU J, et al. Analysis and development outlook on the typical modes of green hydrogen projects [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(3): 89-96. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.009](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.009).
- [8] 瞿小广, 陈波, 杨兴林, 等. 光伏-氢燃料电池集成供电系统设计 [J]. *机械制造与自动化*, 2022, 51(4): 184-187. DOI: [10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2022.04.047](https://doi.org/10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2022.04.047).
- QU X G, CHEN B, YANG X L, et al. Design of integrated power supply system for photovoltaics-hydrogen fuel cells [J]. *Machin building & automation*, 2022, 51(4): 184-187. DOI: [10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2022.04.047](https://doi.org/10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2022.04.047).
- [9] 张诚, 檀志恒, 晁怀颇. “双碳”背景下数据中心氢能应用的可行性研究 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(6): 327-334. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0592](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0592).
- ZHANG C, TAN Z H, CHAO H P. Feasibility study of hydrogen energy application on data “carbon peaking and neutralization” background [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2022, 43(6): 327-334. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0592](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0592).
- [10] 孙旭东, 成雪蕾, 王树萌, 等. 我国新能源风光发电制氢成本动态测算 [J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(6): 1-10. DOI: [10.13226/j.issn.1006-6772.CN22071501](https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.CN22071501).
- SUN X D, CHENG X L, WANG S M, et al. Dynamic cost analysis of hydrogen production from wind power and photovoltaic power [J]. *Clean coal technology*, 2023, 29(6): 1-10. DOI: [10.13226/j.issn.1006-6772.CN22071501](https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.CN22071501).
- [11] 李亮荣, 彭建, 付兵, 等. 碳中和愿景下绿色制氢技术发展趋势及应用前景分析 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(6): 508-520. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0183](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0183).
- LI L R, PENG J, FU B, et al. Development trend and application prospect of green hydrogen production technologies under carbon neutrality vision [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2022, 43(6): 508-520. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0183](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0183).
- [12] 张新宝, 张超, 孟凡朋, 等. 固体氧化物燃料电池的研究进展 [J]. *山东陶瓷*, 2021, 44(1): 9-11.
- ZHANG X B, ZHANG C, MENG F P, et al. Research progress of solid oxide fuel cell [J]. *Shandong ceramics*, 2021, 44(1): 9-11.
- [13] 吴雨泽, 王宇喆, 范红途. 固体氧化物燃料电池 (SOFC) 系统的研究现状 [J]. *能源研究与利用*, 2019(1): 40-46. DOI: [10.16404/j.cnki.issn1001-5523.2019.01.014](https://doi.org/10.16404/j.cnki.issn1001-5523.2019.01.014).
- WU Y Z, WANG Y Y, FAN H T. Research status of solid oxide fuel cell (SOFC) systems [J]. *Energy research & utilization*, 2019(1): 40-46. DOI: [10.16404/j.cnki.issn1001-5523.2019.01.014](https://doi.org/10.16404/j.cnki.issn1001-5523.2019.01.014).
- [14] 闫国华, 闫红丽. 高温燃料电池-发动机混合发电/动力系统研究进展 [J]. *山东化工*, 2021, 50(13): 52-53. DOI: [10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2021.13.022](https://doi.org/10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2021.13.022).
- YAN G H, YAN H L. Advance on high-temperature fuel cell and engine combined system for power generation [J]. *Shandong chemical industry*, 2021, 50(13): 52-53. DOI: [10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2021.13.022](https://doi.org/10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2021.13.022).
- [15] 卢立宁, 李素芬, 沈胜强, 等. 固体氧化物燃料电池与燃气轮机联合发电系统模拟研究 [J]. *热能动力工程*, 2004, 19(4): 358-362, 436-437. DOI: [10.3969/j.issn.1001-2060.2004.04.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2060.2004.04.007).
- LU L N, LI S F, SHEN S Q, et al. Simulation study of a combined power generation system incorporating a solid-oxide fuel cell and a gas turbine [J]. *Journal of engineering for thermal energy and power*, 2004, 19(4): 358-362, 436-437. DOI: [10.3969/j.issn.1001-2060.2004.04.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2060.2004.04.007).
- [16] 段立强, 和彬彬, 杨勇平. SOFC/MGT 顶层循环混合发电系统改进 [J]. *热能动力工程*, 2010, 25(3): 344-349, 362.
- DUAN L Q, HE B B, YANG Y P. Improvement of a SOFC/MGT (solid oxide fuel cell/micro gas turbine) top-level cycle hybrid power generation system [J]. *Journal of engineering for thermal energy and power*, 2010, 25(3): 344-349, 362.
- [17] 陈启梅, 翁一武, 翁史烈, 等. 燃料电池-燃气轮机混合发电系统性能研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(4): 31-35. DOI: [10.3321/j.issn:0258-8013.2006.04.007](https://doi.org/10.3321/j.issn:0258-8013.2006.04.007).
- CHEN Q M, WENG Y W, WENG S L, et al. Performance analysis of a hybrid system based on a fuel cell and a gas turbine [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(4): 31-35. DOI: [10.3321/j.issn:0258-8013.2006.04.007](https://doi.org/10.3321/j.issn:0258-8013.2006.04.007).
- [18] 岳秀艳, 韩吉田, 于泽庭, 等. 设置富氨蒸气回热器的固体氧化物燃料电池/燃气轮机/卡琳娜联合循环系统的热力性能分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(26): 4483-4492. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.26.006](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.26.006).
- YUE X Y, HAN J T, YU Z T, et al. Thermodynamic analysis of

- SOFC/GT/KCS integrated power generation system with reheater of concentrated ammonia vapor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(26): 4483-4492. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.26.006.
- [19] 蒙青山, 孔令健, 张涛, 等. 基于 SOFC/GT 和跨临界 CO₂ 联合循环系统热力性能研究 [J]. *太阳能学报*, 2017, 38(10): 2778-2784. DOI: 10.19912/j.0254-0096.2017.10.023.
- MENG Q S, KONG L J, ZHANG T, et al. Thermodynamic performance analysis of combined cycle system based on SOFC/GT and transcritical carbon dioxide [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2017, 38(10): 2778-2784. DOI: 10.19912/j.0254-0096.2017.10.023.
- [20] WANG J F, YAN Z Q, MA S L, et al. Thermodynamic analysis of an integrated power generation system driven by solid oxide fuel cell [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2012, 37(3): 2535-2545. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.10.079.
- [21] GANDIGLIO M, LANZINI A, LEONE P, et al. Thermo-economic analysis of large solid oxide fuel cell plants: atmospheric vs. pressurized performance [J]. *Energy*, 2013, 55: 142-155. DOI: 10.1016/j.energy.2013.03.059.
- [22] 杨智敏, 林比宏. 不可逆高温燃料电池的性能分析与参数优化 [J]. *电源技术*, 2020, 44(10): 1443-1446, 1474. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2020.10.011.
- YANG Z M, LIN B H. Performance analyses and parametric design strategies of irreversible high temperature fuel cell [J]. *Chinese journal of power sources*, 2020, 44(10): 1443-1446, 1474. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2020.10.011.
- [23] 梁前超, 乔润鹏, 何俊能, 等. 固体氧化物燃料电池建模仿真与性能研究 [J]. *海军工程大学学报*, 2021, 33(6): 77-81, 87. DOI: 10.7495/j.issn.1009-3486.2021.06.013.
- LIANG Q C, QIAO R P, HE J N, et al. Modeling simulation and performance research of solid oxide fuel cell [J]. *Journal of naval university of engineering*, 2021, 33(6): 77-81, 87. DOI: 10.7495/j.issn.1009-3486.2021.06.013.
- [24] 魏炜, 张宇, 董超, 等. H₂-CO 燃料气对 SOFC 性能影响研究 [J]. *电源技术*, 2021, 45(12): 1589-1593. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2021.12.018.
- WEI W, ZHANG Y, DONG C, et al. Study on performance of SOFC using H₂-CO as fuel gas [J]. *Chinese journal of power sources*, 2021, 45(12): 1589-1593. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2021.12.018.
- [25] 王佳宾, 徐虎, 董平, 等. 基于金属铝水反应的固体氧化物燃料电池/氦氙布雷顿循环动力系统研究 [J]. *推进技术*, 2022, 43(10): 55-63. DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.210426.
- WANG J B, XU H, DONG P, et al. Solid oxide fuel cell/helium-xenon Brayton cycle power system based on aluminum water combustion [J]. *Journal of propulsion technology*, 2022, 43(10): 55-63. DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.210426.
- [26] PENG W K, CHEN H, LIU J, et al. Techno-economic assessment of a conceptual waste-to-energy CHP system combining plasma gasification, SOFC, gas turbine and supercritical CO₂ cycle [J]. *Energy conversion and management*, 2021, 245: 114622. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114622.
- [27] ALMEIDA PAZMIÑ G A, JUNG S, ROH S H. Process modeling of a hybrid-sulfur thermochemical cycle combined with solid oxide fuel cell/gas turbine system [J]. *Energy conversion and management*, 2022, 262: 115669. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115669.
- [28] 陆玉正. 太阳能与固体氧化物电解池联合制氢关键技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- LU Y Z. Research on key issue on hydroxy production combining solar energy and low temperature of solid oxide electrolysis cells [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [29] 王春晓. 低压饱和蒸汽轮机的结构设计优化 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2013. DOI: 10.7666/d.J0105890.
- WANG C X. Structure design and optimization of low-pressure saturated steam turbine [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2013. DOI: 10.7666/d.J0105890.
- [30] 张秦玮, 张筱松, 邓美隆. 一种新型化学链制氢与 SOFC 集成的能量系统 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(5): 1804-1810. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.200559.
- ZHANG Q W, ZHANG X S, DENG M L. A novel system integrating chemical-looping hydrogen generation and solid oxide fuel cell [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(5): 1804-1810. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.200559.
- [31] CHINDA P, BRAULT P. The hybrid solid oxide fuel cell (SOFC) and gas turbine (GT) systems steady state modeling [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2012, 37(11): 9237-9248. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.03.005.

作者简介:



程云端

程云端(第一作者, 通信作者)

1998-, 男, 一级设计研究员, 上海电力大学热能工程硕士, 主要从事氢能研究及配电网规划研究工作(e-mail)13370083231@163.com。

项目简介:

项目名称 源网荷储一体化柔性调控数字基座(2023年 ER11221W)**承担单位** 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司**项目概述** 项目主要研发智慧调控智慧运维、一体化平台构建数字化底座, 形成能建自主可控的“源网荷储数字化平台技术路线、技术方案, 打造以“储能+新能源”为核心的智慧调控运维一体化应用示范。

(编辑 徐嘉铨)